

非线性度法在配电网谐波源探测中的应用

龚华麟, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对用户负荷的非线性度与其谐波发射水平呈正比关系的特点, 从谐波产生的角度出发克服系统侧背景谐波干扰, 提出了一种基于单相和三相不平衡负荷的非线性度 NLD (Non-linearity Degree) 探测配电网中谐波源的新方法。基于用户负荷的时域等值模型, 对实际测量到公共连接点处 PCC (point of common coupling) 电压和电流值经傅立叶变换消除噪声影响后, 用对称分量法分解出各序分量, 对各序分量求取非线性度, 根据负荷总非线性度辨识出配电网中谐波源。通过对实际工程验证, 证明了该方法的有效性和准确性, 为合理高效治理谐波污染提供了重要依据。

关键词: 谐波; 主要谐波源; 谐波源探测; 非线性度法

Application of non-linearity degree method in harmonic source detecting in distribution network

GONG Hua-lin, XIAO Xian-yong

(School of Electrical Engineering & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The detection of harmonic sources in distribution network is a key to control harmonic pollution effectively. This paper proposes an algorithm that can calculate the nonlinear degree of single-phase and unbalanced three-phase loads to identify the harmonic source in distribution network based on the theory that the harmonic emission level is in proportion to non-linearity degree (NLD) of the load. Through the harmonic equivalent load model in time domain, the algorithm firstly makes Fourier transform on the voltage and current data collected at the point of common coupling (PCC) to eliminate noise and decomposes sequence components by symmetrical component method, then calculates the load non-linearity degree of each component, finally judges whether the load is a harmonic source or not according to the load nonlinear degree. The results of field test show that the load non-linearity degree method is able to detect the harmonic source correctly in the actual applications.

This work is supported by Basic Research Program of Sichuan Province (No.2008JY0043-2).

Key words: harmonic; main harmonic source; harmonic source detecting; non-linearity degree method

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0030-05

0 引言

随着社会经济的快速发展, 整流装置、电弧炉、变频装置、电气化铁路等大量非线性负荷接入电网, 引起系统内电压、电流波形畸变, 造成的谐波污染越来越严重, 引起了企业和学术界的重视^[1]。合理准确辨识出配电网中谐波源是治理谐波污染的关键。其难点^[2]在于公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)测得的谐波是负荷和系统背景谐波共同作用的结果, 而目的在于区分出负荷的谐波责任, 以确定该负荷是否为谐波源。

现有评估方法有定量法^[3-4]和定性法。定量的方

法在定性的方法探测出谐波源的基础上, 进一步计算出具体谐波发射水平。定性法主要运用于辨识出配电系统中的谐波源, 有谐波畸变率指标法^[5]、有功功率法^[6]、临界阻抗法^[7]、瞬时负荷参数分割法^[8]等。其中, 谐波畸变率指标法是最常用的方法, 其原理简单, 但未考虑系统侧背景谐波的影响; 有功功率法根据谐波有功方向判定谐波源, 原理简单, 方案可行, 但准确度不高; 临界阻抗法通过判定吸收系统谐波无功的临界阻抗, 用系统侧和用户侧的平均谐波阻抗判定谐波源, 但准确估计系统侧和用户侧谐波阻抗值很难; 瞬时负荷参数分割法根据用户侧负荷的非线性度进行谐波源识别, 无需事先知道系统和负荷的参数, 方法可行, 但如何准确确定负荷参数仍需进一步研究, 在此基础上文献[9-10]

基金项目: 四川省应用基础研究项目(2008JY0043-2)

用单相基波电压、电流计算非线性负荷的线性分量,再估计负荷非线性度,方法的可信度较高,但不能反映三相负荷的不对称情况。

本文立足于工程实际情况,根据负荷谐波发射水平与其非线性度呈正比的特点辨识配电网中的谐波源,从负荷时域等值模型出发,在不知系统和用户侧负荷参数的情况下,根据 PCC 点实测三相电压和负荷电流,通过傅立叶变换去除噪声干扰,同时考虑到三相负荷的不对称情况,采用对称分量法进行对称分解后,再评估负荷的非线性度,并根据负荷非线性度的大小判别配电网中的谐波源。通过实际工程验证了本文方法的有效性和正确性,对进一步进行谐波污染治理提供合理依据。

1 负荷非线性度辨识谐波源原理

实际系统中,电压、电流波形畸变主要由负荷非线性特性引起。如图 1,当正弦电流流过线性负荷时,通过投影可知,该负荷上的电压降为正弦波,电压与电流按确定的比例变化,该比例为负荷线性阻抗;当正弦电流通过非线性负荷时,负荷上的电压降为非正弦波形,电压波形发生畸变,电压与电流按非线性比例变化,此时负荷阻抗呈非线性。频域分析可知,畸变电压波形中包含有谐波分量,这种畸变是由负荷阻抗的非线性特性引起的,故负荷的非线性特性由其阻抗决定,其值可用非线性度来度量。

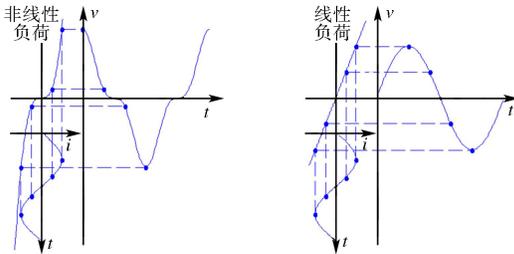


图 1 负荷特性

Fig.1 Voltage waveforms characteristics of loads

负荷非线性度定义为引起电压和电流非常数比例关系的扰动能力。投影分析可知,负荷阻抗的非线性度越高,正弦电流作用下的电压波形畸变越严重,谐波电压含有率越高,即该负荷为接入 PCC 点处主要谐波源。即使系统侧有背景谐波存在,线性负荷在含谐波的电压作用下会产生谐波电流,该电流在负荷线性阻抗上会产生谐波电压,但该谐波电压与系统背景谐波电压是一致的,负荷阻抗的非线性度仍然为 0,不是配电网中谐波源。因此,如何能准确估计负荷非线性度,是从根本上辨识配电网

谐波源的关键。

2 负荷非线性度估计

2.1 负荷等效模型

根据文献[11]提出的非线性负荷时域模型,由于负荷大多呈感性,略去电容分量,其时域等值模型如图 2,其中, $i_c(t)$ 为负荷等效谐波源,当负荷为线性时,谐波源电流为 0; R 和 L 为构成负荷阻抗的电阻和电抗参数; $v_{pcc}(t)$ 、 $i_{pcc}(t)$ 为 PCC 点负荷测量电压和电流。

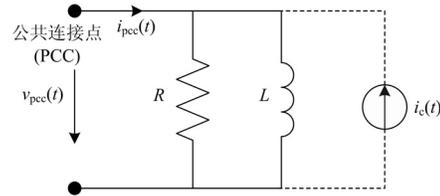


图 2 负荷时域等值模型

Fig.2 Equivalent circuit for single load in time domain

2.2 负荷 R、L 值计算

当负荷为线性负荷时,根据测量值 $v_{pcc}(t)$ 、 $i_{pcc}(t)$ 由式(1)可确定负荷参数 R 、 L 值,此时, R 、 L 值呈线性关系;当负荷为非线性负荷时,按照微元法的思想,采用分段线性化法^[13],可认为电压 $v_{pcc}(t)$ 和电流 $i_{pcc}(t)$ 在一个较小时间间隔 T_{inv} 内计算得到的负荷阻抗是线性的,这样在 1 个 T_{inv} 内负荷阻抗参数 R 、 L 同样可由式(1)确定,而在整个采样周期内 R 、 L 呈非线性关系,如图 3,其中虚线框内线段为非线性参数局部放大图。文献[8]指出,非线性负荷得出的 R 、 L 值,不完全代表负荷的实际参数,而是体现出负荷的电压电流间的数学关系,其非线性程度即是负荷的非线性度。

$$i_{pcc}(t) = \frac{v_{pcc}(t)}{R} + \frac{1}{L} \int v_{pcc}(t) dt \quad (1)$$

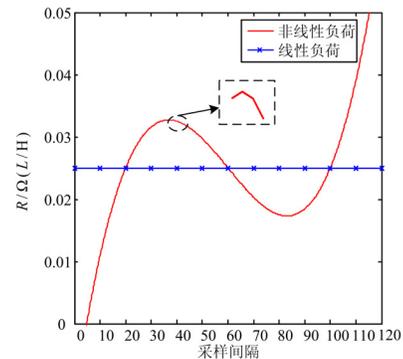


图 3 负荷参数示意图

Fig.3 Scheme of load parameters

在 PCC 点处采样得到的电压电流数据中混有

大量的电磁噪声, 而傅立叶变换能够有效提取基频和谐波信号抑制噪声干扰。故本文的非线性度估计是基于对已知电压、电流的傅立叶变换后的数据进行估计, 如式(2), 其中 h 为谐波次数, $h=1, 2, \dots, M$; V_h 、 I_h 为谐波电压、电流有效值; α_h 、 β_h 为谐波电压电流相位角; ω 为工频角速度, 并已知该数据的采样频率为 f_s 。

$$v_{\text{pcc}}(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^M V_h \cos(h\omega t + \alpha_h) \quad (2)$$

$$i_{\text{pcc}}(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^M I_h \cos(h\omega t + \beta_h)$$

$$t = nT_{\text{inv}}, n=1, 2, \dots, 1/(fT_{\text{inv}}) \quad (3)$$

根据式(3)对式(2)取不同的采样时间进行离散化处理可得不同测量时刻的电压、电流瞬时值 $v_1 \sim v_n$ 、 $i_1 \sim i_n$, 式中 f 为基波频率, T_{inv} 为离散化的时间间隔。为了体现负荷在 T_{inv} 内有良好的线性特性, 故 T_{inv} 应取较小值, 但为了保持离散数据的有效性, 其取值不应小于 $1/f_s$ 。根据这些瞬时值建立方程组, 如式(4), 其中, v_n 、 v_{n-1} 、 i_n 、 i_{n-1} 和 y_n 、 y_{n-1} 分别为 t_n 、 t_{n-1} 相邻两个时刻的电压、电流和电压积分值。通过矩阵运算可求得被测负荷参数值 ($[R_1, R_2, \dots, R_n]$ 和 $[L_1, L_2, \dots, L_n]$)。

$$\begin{bmatrix} i_{n-1} \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{n-1} & y_{n-1} \\ v_n & y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ R_n \\ 1 \\ L_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{令 } y(t) = \int v_{\text{pcc}}(t) dt = \sqrt{2} \sum_{h=1}^M \frac{M_h}{h\omega} \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (5)$$

2.3 负荷线性 R 、 L 值估计

在物理意义上, 负荷参数随时间变化, 其阻抗参数值 (R 、 L) 不只是反映负荷的特性, 更多的是体现负荷的电压电流比例关系, 反映负荷的线性特性和非线性特性。通过对式(4)求得电压电流比例系数 (R_i 、 L_i) 求取平均系数, 可得负荷呈现线性时的电压电流比例关系 R_{linear} 及 L_{linear} , 如式(6), 式中 $N=1/(fT_{\text{inv}})$ 。

$$R_{\text{linear}} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N/2} R_i, L_{\text{linear}} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N/2} L_i \quad (6)$$

根据求均值的方法, 可得负荷的线性时的电压电流比例关系, 但求解过程易受异常值影响。根据式(4)所得的 R_i 、 L_i 值, 因受到电压、电流和电压积分样本过零点的影响, 可能出现异常值, 从而影响线性比例关系的估计的精度。根据文献[12]提出通

过 Nair 系数法去除异常值的方法, 去除式(4)计算结果中的异常值后, 再根据式(6), 计算 R_{linear} 及 L_{linear} , 可提高估计的精度。

2.4 负荷非线性度确定

立足于负荷的非线性度代表电压和电流非常数比例关系扰动能力, 故可假设负荷完全呈线性时, 根据式(7), 求取其电流值 $i_{\text{pcc-linear}}(t)$, 比较其值和实测电流值 $i_{\text{pcc}}(t)$ 之间差异, 即非线性程度, 如式(8), 得到负荷每一时刻的非线性度变化趋势 $T(t)$ 。运用统计的方法由式(9)计算出负荷总体非线性度 NLD, 作为判别负荷是否为谐波源的依据, 式中 $N=1/(fT_{\text{inv}})$ 。

$$i_{\text{pcc-linear}}(t) = \frac{v_{\text{pcc}}(t)}{R_{\text{linear}}} + \frac{1}{L_{\text{linear}}} \int v_{\text{pcc}}(t) dt \quad (7)$$

$$T(t) = \frac{i_{\text{pcc-linear}}(t) - i_{\text{pcc}}(t)}{i_{\text{pcc}}(t)} \quad (8)$$

$$\text{NLD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N T(t)^2} \quad (9)$$

3 三相不平衡负荷的处理

当负荷三相不平衡时, 实测电压、电流相互影响, 难以判定负荷每相的非线性度。将不对称负荷等效为如图 2 所示电路, 线性阻抗分量代表负荷的线性功率特征, 而负荷的非线性特性由等效谐波源确定(当负荷为线性时其值为 0), 在较短时间段内可认为负荷是呈线性关系(两个瞬时值之间), 即满足线性系统内的一切性质, 因此可使用对称分量法把该模型中不平衡分量分解为三序对称分量^[13]。首先把 PCC 点测量得到的电压电流数据经傅立叶变化去除噪声后, 经对称分量变换得到电压电流的正序、负序和零序分量, 取不同时间点, 得到电压电流的瞬时值, 由式(4)~(9)计算各序分量的非线性度, 并由式(10)估计出三相不平衡负荷的非线性度 $\text{NLD}_{3\text{phase}}$, 其中 I_+ 、 I_- 和 I_0 表示经对称分量变换后的各序电流有效值, h 代表谐波次数, NLD_+ 、 NLD_- 和 NLD_0 为负荷各序非线性度。

$$I_+ = \sqrt{\sum_{h=1}^M I_{h+}^2}, I_- = \sqrt{\sum_{h=1}^M I_{h-}^2}, I_0 = \sqrt{\sum_{h=1}^M I_{h0}^2} \quad (10)$$

$$\text{NLD}_{3\text{phase}} = \frac{I_+ \cdot \text{NLD}_+ + I_- \cdot \text{NLD}_- + I_0 \cdot \text{NLD}_0}{I_+ + I_- + I_0}$$

4 实际工程验证

实测数据来自某 35 kV 配电网(如图 4), 该配电网非线性负荷以 6 脉波整流负荷为主, 特征谐波

为 5 次, 7 次, 11 次, 13 次, 设定采样率 6.4 kHz。测量点 1、2、3 分别对应负荷 A、B、C, 图 5~7 分别给出相应负荷其中一相的电压、电流值。由于负荷接于同一母线, 不同时间测得的电压畸变率相差并不大, 而负荷 A、B 电流畸变率明显偏大, 具体电压电流畸变率由表 1 所示。

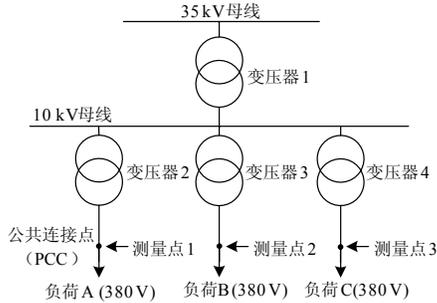


图 4 某 35 kV 配电网

Fig.4 A 35 kV distribution power network

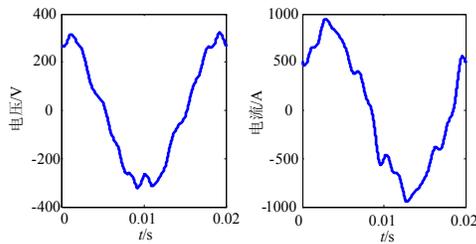


图 5 负荷 A 电压电流波形

Fig.5 Voltage and current waveform of the load A

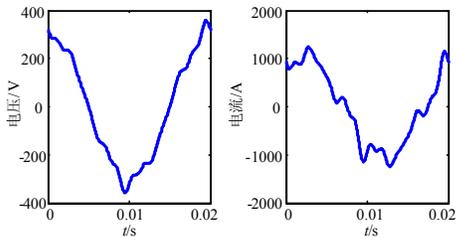


图 6 负荷 B 电压电流波形

Fig.6 Voltage and current waveform of the load B

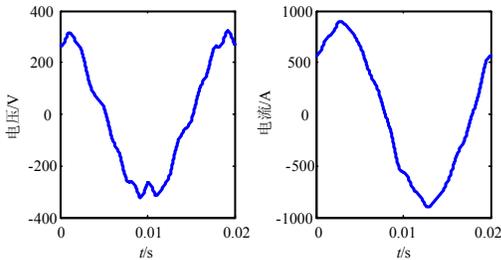


图 7 负荷 C 电压电流波形

Fig.7 Voltage and current waveform of the load C

表 1 负荷电压电流谐波畸变率

Tab.1 The total harmonic distortion of the loads

负荷编号	电压畸变率	电流畸变率
A	9.47%	14.14%
B	9.73%	21.68%
C	9.15%	4.41%

分别对 3 个负荷非线性度进行计算, 结果如表 2 所示, 负荷 A、B 的非线性度远大于负荷 C, 即负荷 A、B 谐波发射水平高于负荷 C, 表明负荷 A、B 为主要谐波源, 这与表 1 中谐波电流畸变率结果相对应, 但非线性度估计结果克服背景谐波影响, 从本质上反映了该配电网中各个负荷的谐波污染责任, 为下一步进行谐波治理提供合理依据。

表 2 负荷非线性度

Tab.2 Nonlinear degree of the loads

负荷编号	非线性度
A	5.231 0
B	7.806 6
C	0.855 4

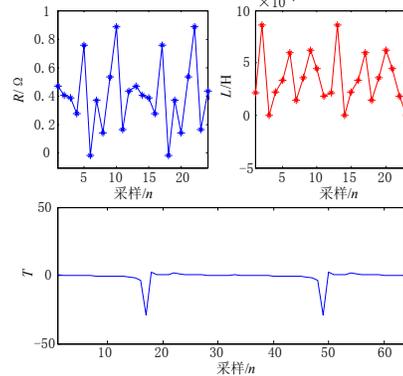


图 8 负荷 A 参数和非线性度

Fig.8 R and L values and nonlinear degree of the load A

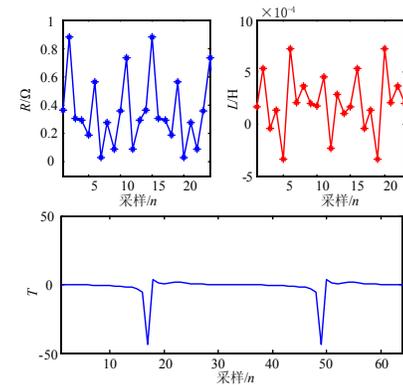


图 9 负荷 B 参数和非线性度

Fig.9 R and L values and nonlinear degree of the load B

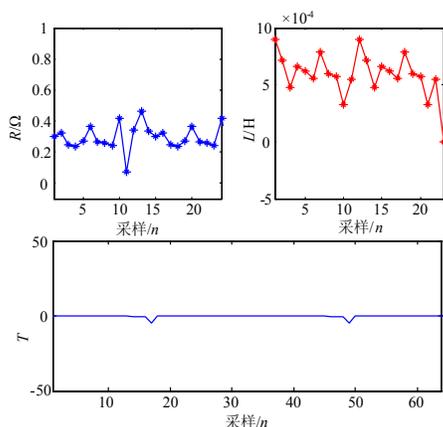


图 10 负荷 C 参数和非线性度

Fig.10 R and L values and nonlinear degree of the load C

图 8~10 为负荷 A~C 的负荷参数及非线性度变化趋势图。负荷 C 的 $R(t)$ 、 $L(t)$ 值变化平稳，非线性程度低，而负荷 A、B 的 $R(t)$ 、 $L(t)$ 值波动较大，非线性程度和谐波发射水平较高，故负荷 A、B 在该配电网中承担主要谐波污染责任，再次证明了表 2 的结论和文章提出的方法的准确可信。

5 结论

本文立足于工程实际，从负荷非线性度与谐波发射水平的关系出发，提出了负荷的非线性度检测配电网中谐波源的方法。对实际配电网中测量得到的电压电流数据通过傅立叶变化进行消噪处理抑制电磁干扰对谐波源辨识的影响，并利用对称分量法对三相不对称负荷进行处理，提高辨识的准确性和实用性。实际工程算例分析证明，本文提出的基于负荷非线性度辨识配电网谐波源方法的正确性和有效性，对下一步进行谐波治理提供重要依据。

参考文献

- [1] 贺建闽, 黄治清. 用户谐波电流发射限值计算[J]. 继电器, 2007, 35 (1): 42-46.
HE Jian-min, HUANG Zhi-qing. Determination of Emission Limit of Customer's Harmonic Current[J]. Relay, 2007, 35 (1): 42-46.
- [2] 欧阳森, 任震. 谐波源检测与识别方法综述[J]. 电网技术, 2006, 30: 151-156.
OUYANG Sen, REN Zhen. A Survey on Monitoring and Identifying Methods of Harmonic Sources[J]. Power System Technology, 2006, 30: 151-156(in Chinese).
- [3] 陈彬, 唐云龙, 徐立明, 等. PCC 处谐波分析的新方法[J]. 继电器, 2006, 34 (9): 60-63.
CHEN Bin, TANG Yun-long, XU Li-ming, et al. New Method for Analysing the Harmonics on PCC[J]. Relay, 2006, 34 (9): 60-63.

- [4] 田立亭, 程林, 孙元章, 等. 用户侧谐波源对 PCC 谐波水平的影响与区分[J]. 继电器, 2007, 35(21): 59-63.
TIAN Li-ting, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Effect of Custom Harmonic Sources on PCC Harmonic Level[J]. Relay, 2007, 35 (21): 59-63.
- [5] 国家技术监督局. GB/T 14549-93 电能质量公用电网谐波[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994.
National Bureau of Standards. GB/T 14549-93 Quality of Electric Energy Supply Harmonics in Public Supply Network[M]. Beijing: China Water Power Press, 1994.
- [6] XU Wilsun, LIU Xian, LIU Yi-lu. An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 18 (1): 214-219.
- [7] LI Chun, XU Wilsun, Tayjasanant T. A Critical Impedance Based Method for Identifying Harmonic Sources[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (2): 671-678.
- [8] Moustafa A A, Moussa A M, El-Gammal M A. Separation of Customer and Supply Harmonics in Electrical Power Distribution Systems[A]. in: International Conference Proceedings of Harmonics and Quality of Power[C]. Florida: 2000.1035-1040.
- [9] Kandil M S, Farghal S A, Elmitwally A. Refined Power Quality Indices[J]. IEE Proceedings-generation Transmission and Distribution, 2001, 148 (6): 590-596.
- [10] Antonio Dell'Aquila, Maria Marinelli, Vito Giuseppe Monopoli, et al. New Power-quality Assessment Criteria for Supply Systems Under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (3): 1284-1290.
- [11] 吴笃贵, 徐政. 电力负荷的谐波建模[J]. 电网技术, 2004, 28 (3): 20-24.
WU Du-gui, XU Zheng. Harmonic Modeling of Electric Loads[J]. Power System Technology, 2004, 28 (3): 20-24(in Chinese).
- [12] GB4883-85, 数据统计处理和解释—正态样本异常值的判断和处理[S].
- [13] 冯士刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 基于瞬时对称分量的负荷谐波建模[J]. 高电压技术, 2008, 34 (4): 783-787.
FENG Shi-gang, AI Qian, XU Wei-hua, et al. Harmonic Modeling of Electric Loads Based on Instantaneous Symmetrical Components[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (4): 783-787(in Chinese).

收稿日期: 2009-05-27

作者简介:

龚华麟 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量及其控制技术; E-mail: gonghualin@163.com

肖先勇 (1968-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事电能质量及其控制技术等方面的教学和研究. E-mail: xiaoxianyong@scu.edu.cn